

*główna siła nagniatania, warstwa wierzchnia, stan powierzchni, technologia obróbki nagniataniem, metody numeryczne, modelowanie i symulacja procesów, Metoda Elementu Skończonego, principal burnishing force, surface layer, surface condition, burnishing processing technology, numerical methods, modeling and simulation of processes, Finite Element Method*

Radosław PATYK<sup>1</sup>  
Sylwia PATYK<sup>2</sup>  
Leon KUKIEŁKA<sup>3</sup>

## **OKREŚLANIE GŁÓWNEJ SIŁY NAGNIATANIA CHROPOWATEJ POWIERZCHNI WALCOWEJ O REGULARNYM OKRESOWYM ZARYSIE NIERÓWNOŚCI METODAMI NUMERYCZNYMI**

W artykule przedstawiono wzory i metody umożliwiające określanie głównej siły nagniatania tocznego z dociskiem elastycznym chropowatej powierzchni walcowej. Jest to problem podstawowy, którego rozwiązanie jest niezbędne do prawidłowego zaprojektowania procesu technologicznego z zastosowaniem powierzchniowej obróbki plastycznej. Do rozwiązania postawionego problemu zastosowano trzy sposoby: opracowano autorski algorytm oraz zaimplementowano go w programie autorskim SYMUL-NAGN, opracowano aplikację MES z zastosowaniem komercyjnego systemu LS-DYNA oraz w celu weryfikacji obliczonych wyników przeprowadzono badania eksperymentalne.

## **DETERMINATION OF THE PRINCIPAL BURNISHING FORCE ROLLER ROUGHNES SURFACE WITH REGULAR PERIODICAL OUTLINES ASPERITIES USING NUMERICAL METHODS**

The article presents the formulas and methods to enable identification of the principal force of burnishing rolling-loaded flexible cylindrical surface rough. This is the basic problem, whose solution is necessary for proper design process using the forming surface. To solve the given problem there are three ways: developed and implemented proprietary algorithm it in the copyright SYMUL-NAGN, developed an application using the commercial FEM system LS-DYNA and to verify the calculated results of experimental research was conducted.

### **1. WSTĘP**

Głównym problemem technik wytwarzania jest optymalne, ze względu na przyjęte kryteria, kształtowanie wyrobu o z góry określonych właściwościach eksploatacyjnych. Zastosowane obróbki wykończeniowej ostatecznie kształtują właściwości warstwy wierzchniej (WW), które to w określonych warunkach eksploatacyjnych decydują o trwałości i niezawodności części maszyn. Jedną z metod obróbki wykończeniowej części maszyn, umożliwiającej kształtowanie WW o korzystnych właściwościach eksploatacyjnych, jest powierzchniowa obróbka plastyczna - nagniatanie. Polega ona na wywołaniu miejscowego odkształcenia plastycznego w celu poprawienia gładkości powierzchni i/lub umocnienia mechanicznego WW połączonego z konstytuowaniem w niej naprężeń ściskających, powodujących zwiększenie odporności na zużycie eksploatacyjne. Efektem oddziaływania elementów nagniatających na powierzchnię obrabianą części jest poprawienie jakości technologicznej oraz użytkowej części [1, 2].

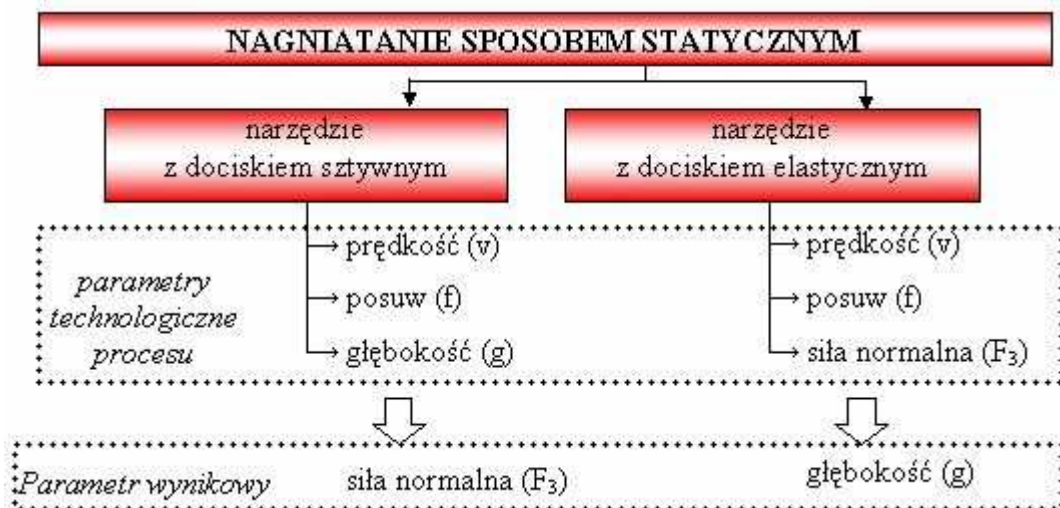
Różnorodność przeznaczenia części oraz różnorodność warunków ich eksploatacji powodują, że wymagania dotyczące stanu warstwy wierzchniej i dokładności wymiarowo-kształtowej są zróżnicowane. Wiadomo, że istotny wpływ na jakość produktu ma jakość półfabrykatu. Dotychczas tradycyjne nagniatanie rzadko stosowano na skalę przemysłową, gdyż brak było wytycznych dotyczących doboru parametrów technologicznych procesu nagniatania oraz są niejednoznaczne dane dotyczące umiejscowienia tej operacji w procesie wytwarzania, co uniemożliwia tym samym sterowanie jakością WW wyrobu. Istotny wpływ na jakość technologiczną wyrobu nagniatanego mają parametry technologiczne obróbki, współczynnik tarcia oraz zarys nierówności (trójkątny, trapezowy itd.) powierzchni nagniatanej powstały w obróbce poprzedzającej [3÷7].

W procesie nagniatania sposobem statycznym, siła naporu (docisku) może być wywierana w sposób sztywny lub sprężysty (podatny, elastyczny) przez odpowiednie elementy konstrukcyjne narzędzia (rys. 1).

<sup>1</sup> Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-453 Koszalin; ul. Śniadeckich 2, e-mail: radoslaw.patyk@tu.koszalin.pl

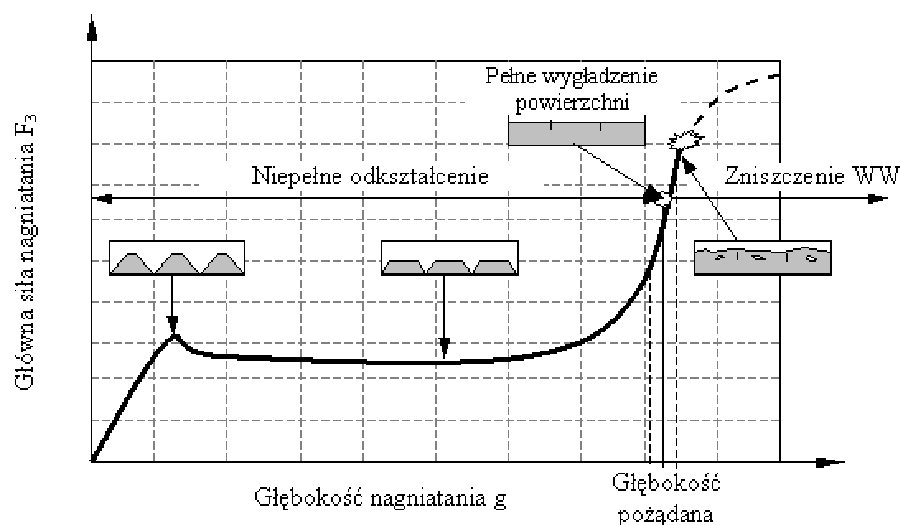
<sup>2</sup> Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-453 Koszalin; ul. Śniadeckich 2, e-mail: sylwia.patyk@interia.pl

<sup>3</sup> Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-453 Koszalin; ul. Śniadeckich 2, e-mail: leon.kukielka@tu.koszalin.pl



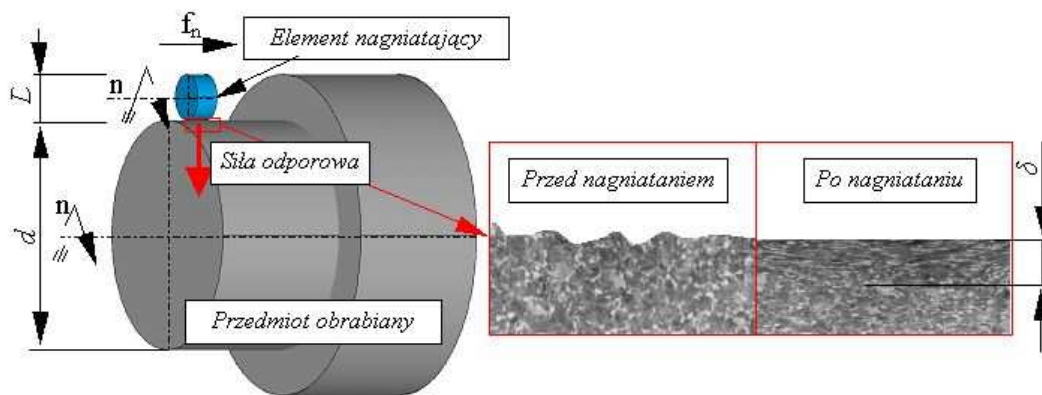
Rys. 1. Podział nagniatania za względu na sposób wywierania składowej normalnej ( $F_3$ ) siły nagniatania

Dla przypadku nagniatania z dociskiem sztywnym, siła wywołwana jest poprzez wzajemne oddziaływanie naprężeniowe narzędzia i przedmiotu, co jest spowodowane sztywnością układu OUPN lub wielkością nadatku na nagniatanie [1]. Nagniatanie toczne ze sztywnym dociskiem elementu nagniatającego powoduje wzrost dokładności wymiarowo-kształtowej, ale jego warstwa wierzchnia (WW) charakteryzuje się nieregularnością chropowatości, nośności i umocnienia, co może niekorzystnie wpływać na właściwości eksploatacyjne wyrobu. Parametrami technologicznymi tego procesu są: prędkość ( $v$ ), posuw ( $f$ ) i głębokość nagniatania ( $g$ ), natomiast parametrem wynikowym jest główna siła normalna ( $F_3$ ), która zależy od stanu części po obróbce poprzedzającej i od warunków realizacji procesu. Natomiast dla przypadku nagniatania z dociskiem sprężystym siła nagniatania nie zależy od wielkości nadatku na nagniatanie, natomiast zależy od nastaw elementów sprężystych narzędzia takich jak sprężyny, siłowniki pneumatyczne i hydrauliczne. Powstała wówczas siła przyjmuje stałą wartość podczas obróbki. Parametrami technologicznymi takiego procesu są: główna siła nagniatania ( $F_3$ ), prędkość ( $v$ ), posuw ( $f$ ). Natomiast parametrem wynikowym jest głębokość ( $g$ ). Nieodpowiedni dobór parametrów technologicznych, głównie sił nagniatania może doprowadzić do zniszczenia WW przedmiotu obrabianego w postaci jej złuszczenia, pęknięć powierzchniowych itp. Dzieje się tak, ponieważ przy braku wytycznych łatwo jest przekroczyć wartość siły wymaganej dla danego rodzaju materiału i jego stanu oraz warunków obróbki poprzedzającej i nagniatania. Schemat wpływu głównej siły nagniatania powierzchni o regularnym zarysie nierówności na odkształcenia WW wyrobu nagniatanego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wpływ głównej siły nagniatania na odkształcenia nierówności powierzchni i kształtowanie WW wyrobu nagniatanego

Podstawowym problemem w projektowaniu procesu nagniatania jest dobór parametrów technologicznych, z których najważniejszym jest główna siła nagniatania  $F_3$ , która jest składową normalną wypadkowej siły nagniatania  $F$ . Nieprawidłowy dobór tego parametru powoduje niezamierzone zmiany wymiarowe i kształtowanie warstwy wierzchniej o właściwościach niezgodnych z wymaganymi. W skrajnych przypadkach może nastąpić zniszczenie WW przedmiotu. Dotychczas zastosowanie nagniatania jako obróbki wykończeniowej i bardzo dokładnej wiązało się z przeprowadzeniem każdorazowo badań eksperymentalnych procesu i na ich podstawie określenie parametrów technologicznych. Dlatego podawane w literaturze wzory na obliczanie sił nagniatania są wzorami empirycznymi. Mnogość proponowanych rozwiązań skłania do porównania wyników obliczonych sił według różnych wzorów empirycznych. Analizowano przykład nagniatania powierzchni czopa wałka (rys. 3). Do najbardziej znanych rozwiązań na główną siłę nagniatania  $F_3$  należą wzory podawane przez firmę Hegenscheidt, Kudriawcew, Chejfic, Kudriawcew-Chejfic, Drozd, Iwanow, które są zamieszczone między innymi w pracach [1, 8, 9]. Wartości sił  $F_3$  niezbędnych do umocnienia WW na głębokość  $\delta = 3$  [mm] obliczone na podstawie tych zależności dla przypadku nagniatania wałka o średnicy czopa  $d = 500$  [mm], twardości materiału części  $HB = 250$ , granicy plastyczności  $R_e = 400$  [MPa], wytrzymałości na rozciąganie  $R_m = 600 \div 710$  [MPa] elementem nagniatającym w postaci krążka dwutoroidalno-walcowego o średnicy  $D = 100$  [mm] wynoszą odpowiednio 417,2 [kN]; 7,2 [kN]; 9,5 [kN]; 93,8 [kN]; 53 [kN] oraz 430 [kN].



Rys. 3. Nagniatanie umacniające czopa wałka

Wartości sił istotnie różnią się od siebie i dlatego należy każdorazowo przeprowadzać badania własne w celu ustalenia parametrów technologicznych procesu. Uzyskane wyniki obliczeń na podstawie analizy literatury wskazują, że celowe jest prowadzenie dalszych badań nad opracowaniem metod obliczania głównej siły nagniatania z uwzględnieniem rzeczywistych warunków procesu. Alternatywą do długotrwałych i drogich badań eksperymentalnych jest proponowane przez autorów numeryczne modelowanie procesu [10÷12]. W celu lepszego poznania zjawiska kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym i procesom towarzyszącym podjęto działania związane z analizą rozkładu i wartości nacisków kontaktowych a co za tym idzie, sił nagniatania. W tym celu przedstawiono dwie metody wyznaczania wartości sił nagniatania. Pierwszym rozwiązaniem jest metoda numeryczna z zastosowaniem Metody Elementu Skończonego, zaś drugim metoda eksperymentalna z zastosowaniem nowoczesnego układu pomiarowego.

## 2. WYPADKOWA SIŁA NAGNIATANIA I JEJ SKŁADOWE

Wypadkowa siła nagniatania  $F$  jest sumą geometryczną składowych sił nagniatania według wzoru:

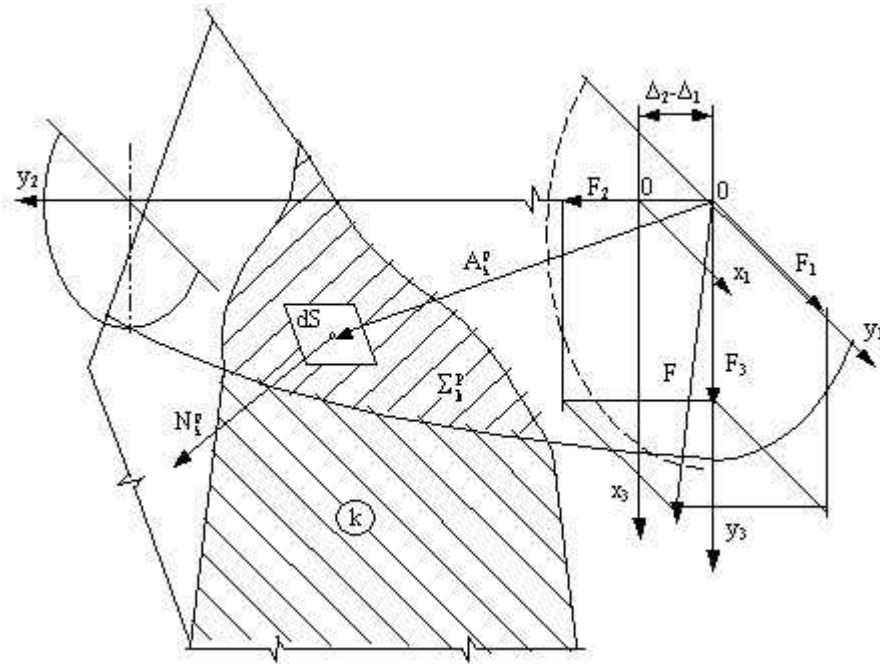
$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}, \quad (1)$$

gdzie  $F_1$  jest siłą styczną,  $F_2$  siłą osiową (wzdłużną),  $F_3$  jest siłą normalną (rys. 4).

Składową siłę nagniatania  $F_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) można obliczyć z zależności:

$$F_i = \sum_{k=0}^{\rho_0-1} F_{ik}^P, \quad (2)$$

gdzie,  $F_{ik}^P$  jest składową siłą nagniatania przypadającą na nierówność  $k$  przedmiotu, w położeniu  $P$  narzędzia, a  $\rho_0$  jest liczbą nierówności odkształczanych plastycznie.

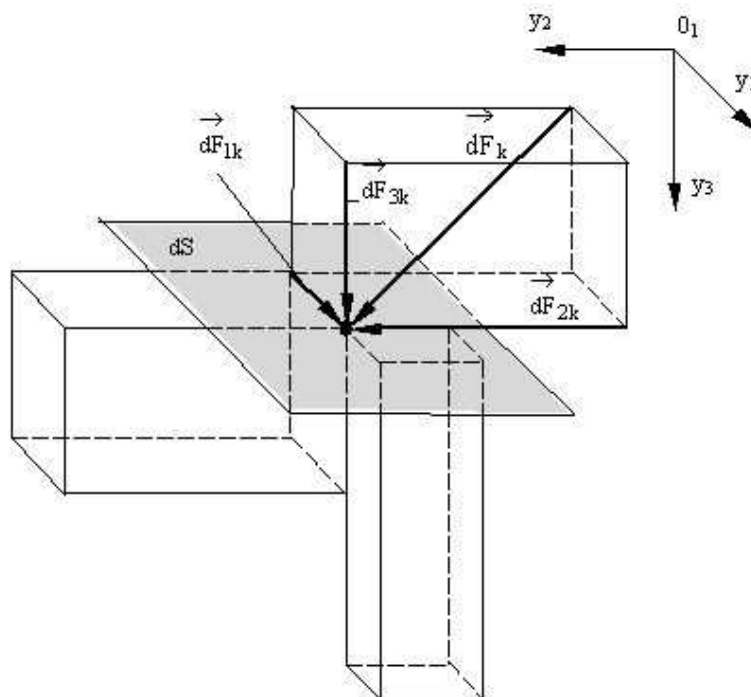


Rys. 4. Wypadkowa siła nagniatania  $F$  i jej składowe  $F_i (i=1,2,3)$  [2]

Siłę  $F_{ik}^p$  opisują zależności:

$$F_{ik}^p = \iint_{\Sigma_k^p} dF_{ik}^p = \iint_{\Omega_{ik}^p} dF_k^p = \iint_{\Omega_{ik}^p} \frac{dF_{ik}^p}{b_i} = \iint_{\Omega_{ik}^p} \frac{q_{ik}^p}{b_i} d\Omega_{ik}^p = \iint_{\Omega_{ik}^p} q_k^p d\Omega_{ik}^p, \quad (3)$$

gdzie:  $b_i = \cos(N_k^p, y_i)$  jest kosinusem kierunkowym elementarnej powierzchni  $dS$ ,  $dF$  jest elementarną siłą działającą na powierzchnię  $dS$ ,  $dF_i$  są składowymi siły  $dF$  (rys. 5),  $q_k^p$  jest jednostkową siłą wypadkową obciążenia nierówności w rozpatrywanym punkcie,  $\Omega_{ik}^p$  jest rzutem obszaru  $\Sigma_k^p$  na płaszczyznę  $y_1 y_2$ ,  $\Sigma_k^p$  obszar kontaktu narzędzia z  $k$ -tą nierównością przedmiotu.

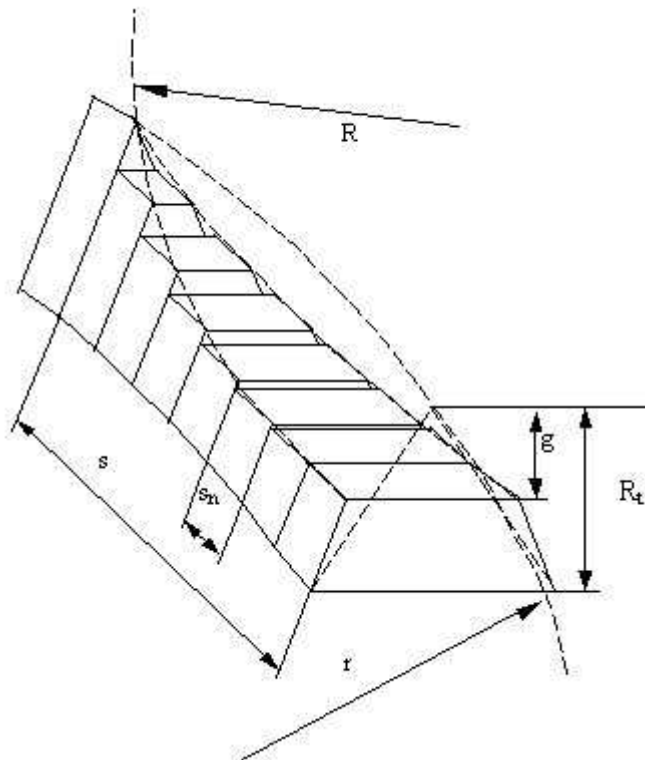


Rys. 5. Siły obciążające elementarną powierzchnię  $dS$

Obliczenie składowych siły nagniatania ze wzoru (3) możliwe jest jedynie dla przypadku, gdy materiał przedmiotu może być traktowany jako ciało idealnie sztywno-plastyczne. Dla innych przypadków, gdy materiał umacnia się, analityczne obliczenie całek we wzorze (3) jest niemożliwe. Wówczas wartość głównej siły nagniatania oblicza się numerycznie.

### 3. ALGORYTM NUMERYCZNEGO OBLICZANIA GŁÓWNEJ SIŁY NAGNIATANIA

W celu numerycznego obliczania głównej siły nagniatania dowolną nierówność  $k$  traktuje się jako zbiór  $N_k$  elementarnych objętości („klinów”) o bardzo małej szerokości  $s_n$  (rys. 6) [2, 9÷13]. Wówczas pochylenie nierówności, zakrzywienie jej grzbietu i zmienne zagłębienie w nią elementu nagniatającego na szerokości  $s_n$  można pominąć. Każdy taki  $n$ -ty klin wydzielony jest dwoma płaszczyznami równoległymi do płaszczyzny  $x_2-x_3$  odległymi od siebie o wartość  $s_n$ .



Rys. 6. Schemat dyskretyzacji  $k$ -tej nierówności w obszarze kontaktu [9]

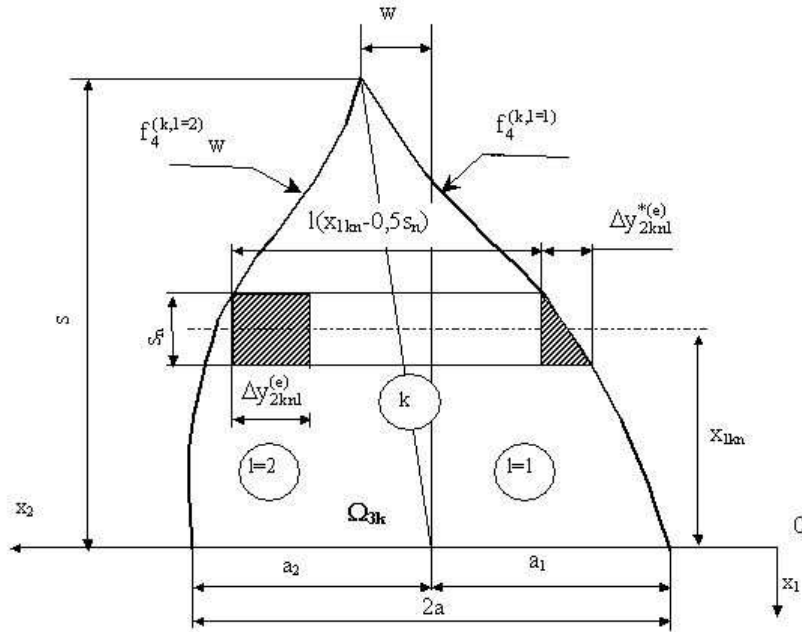
Każdy wyodrębniony  $n$ -ty klin dzieli się elementami skończonymi. Wówczas składową siłę nagniatania dla układu dyskretnego oblicza się ze wzoru:

$$F_i = \sum_{k=0}^{\rho_0-1} \sum_{n=1}^{N_k} \sum_{e=1}^E F_{ikn}^{(e)}, \quad (4)$$

gdzie  $E$  jest liczbą elementów kontaktowych  $n$ -tego klina,  $F_{ikn}^{(e)}$  jest siłą cząstkową działającą na kontaktowy  $e$ -ty element skończony,  $k$ -tej nierówności i wynosi:

$$F_{ikn}^{(e)} = q_{kn}^{(e)} \Delta\Omega_{ikn}^{(e)}, \quad (5)$$

natomiast  $q_{kn}^{(e)}$  jest jednostkową siłą wypadkową działającą na bok rozpatrywanego kontaktowego elementu skończonego,  $\Delta\Omega_{ikn}^{(e)}$  jest powierzchnią rzutu boku tego elementu na płaszczyznę prostopadłą do kierunku działania siły  $F_{ikn}^{(e)}$ .



Rys. 7. Zależności geometryczne w strefie kontaktu elementu nagiatającego z k-tą nierównością [2]

Obliczanie głównej siły nagiatańia  $F_3$  odbywa się według następującej kolejności [2, 9]:

1. Obliczenie wymiarów obszaru kontaktu elementu nagiatającego (narzędzia) z k-tą nierównością.
  - a) Obliczenie wysokości s obszaru kontaktu elementu nagiatającego z k-tą nierównością (rys. 7).  
Przykładowo dla przypadku nagiatańia naporowego tocznego wałków wykorzystuje się wzór:

$$s = \frac{\sqrt{H^2 D^2 - [H^2 + 0,25(D^2 - d^2)]^2}}{2H}, \tag{6}$$

gdzie  $H$  jest odległością osi przedmiotu od osi narzędzia,  $D$  jest średnicą narzędzia,  $d$  średnicą wałka.

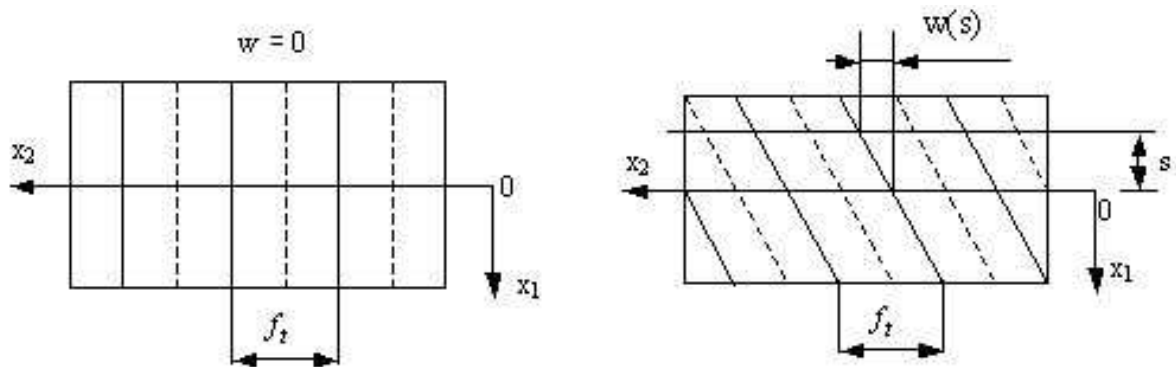
- b) Obliczenie długości podstawy obszaru kontaktu. W przypadku nagiatańia nierówności trójkątnych wzór ma postać:

$$2a = \frac{g \cdot f_t}{R_t - g}, \tag{7}$$

gdzie  $g$  jest głębokością nagiatańia,  $f_t$  jest posuwem nagiatańia,  $R_t$  jest teoretyczną wysokością chropowatości.

- c) Obliczenie pochylenia obszaru kontaktu (rys. 8):

$$w = 0, \text{ dla części płaskiej oraz } w = \frac{f_t}{360} \arcsin \frac{2s}{d}, \text{ dla części obrotowej.} \tag{8}$$



Rys. 8. Pochylenie linii grzbietowej nierówności dla części płaskiej (a) i obrotowej (b) [9]

2. Przyjęcie liczby klinów  $N_k$  i obliczenie ich szerokości  $s_n$ :

$$s_n = \frac{S}{N_k}, \quad \text{gdzie } N_k \in N \quad (9)$$

3. Obliczenie współrzędnej  $x_{1kn}$ , dla  $1 \leq n \leq N_k$ :

$$x_{1kn} = \frac{2n-1}{2} s_n, \quad (10)$$

4. Obliczenie wartości funkcji  $l(x_{1kn} - 0,5s_n)$ :

$$l(x_{1kn} - 0,5s_n) = f_4^{(k,l=2)}(x_{1kn} - 0,5s_n) - f_4^{(k,l=1)}(x_{1kn} - 0,5s_n) \quad (11)$$

gdzie  $f_4^{(k,l=1)}(x_1)$ ,  $f_4^{(k,l=2)}(x_1)$  są liniami ograniczającymi obszar  $\Omega_{3k}$ .

5. Przyjęcie liczby  $E$  elementów kontaktowych  $n$ -tego klina i obliczenie długości boku  $\Delta y_{2kn}^{(e)}$ :

$$\Delta y_{2kn}^{(e)} = \frac{l(x_{1kn} - 0,5s_n)}{E}, \quad \text{gdzie } E \in N \quad (12)$$

6. Obliczenie długości podstawy pól trójkątnych  $\Delta y_{2knl}^{*(e)}$ :

$$\Delta y_{2knl}^{*(e)} = c \left[ f_4^{(k,l)}(x_{1kn} + 0,5s_n) - f_4^{(k,l)}(x_{1kn} - 0,5s_n) \right] \quad (13)$$

7. Obliczenie sił jednostkowych  $q_{kn}^{(e)}$  działających na  $e$ -ty kontaktowy element skończony,  $n$ -tego klina,  $k$ -tej nierówności, zgodnie z metodyką podaną w [2, 9].

- obliczenie intensywności odkształceń plastycznych  $\varepsilon_i$ ,
- obliczenie intensywności prędkości odkształceń  $\dot{\varepsilon}_i$ ,
- obliczenie temperatury  $T$ ,
- obliczenie termodynamicznych naprężeń uplastyczniających  $\sigma_p(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T)$ ,
- obliczenie sił jednostkowych  $q_{kn}^{(e)}$  – rozwiązanie warunku brzegowego dla naprężeń.

8. Obliczenie sił cząstkowych działających na  $e$ -ty element skończony:

$$F_{3kn}^{(e)} = q_{kn}^{(e)} s_n \Delta y_{2knl}^{(e)}, \quad \text{dla elementów prostokątnych,} \quad (14a)$$

$$F_{3kn}^{(e)} = 0,5 q_{kn}^{(e)} s_n \Delta y_{2knl}^{*(e)}, \quad \text{dla elementów trójkątnych,} \quad (14b)$$

9. Obliczenie sił cząstkowych działających na  $n$ -ty klin:

$$F_{3kn} = \sum_{e=1}^E F_{3kn}^{(e)} \quad (15)$$

10. Obliczenie siły normalnej działającej na  $k$ -tą nierówność:

$$F_{3k} = \sum_{n=1}^{N_k} F_{3kn} \quad (16)$$

11. Obliczenie głównej siły nagniatania:

$$F_3 = \sum_{k=0}^{\rho_0-1} F_{3k}. \quad (17)$$

Przedstawiony powyżej algorytm zastosowano w autorskim programie komputerowym SYMUL-NAGN [2].

#### 4. PRZYKŁAD NUMERYCZNY

Wyznaczenie głównej siły nagniatania przeprowadzono trzema sposobami tj. obliczenia numeryczne w programie SYMUL-NAG, obliczenia numeryczne z zastosowaniem komercyjnego programu wykorzystującego Metodę Elementu Skończonego – LS-DYNA oraz weryfikacja eksperymentalna uzyskanych wyników obliczeń. Obliczenia siły nagniatania przeprowadzono dla następujących danych wejściowych procesu statycznego nagniatania tocznego z dociskiem elastycznym: krążek nagniatający dwutoroidalno-walcowy o średnicy  $D = 52$

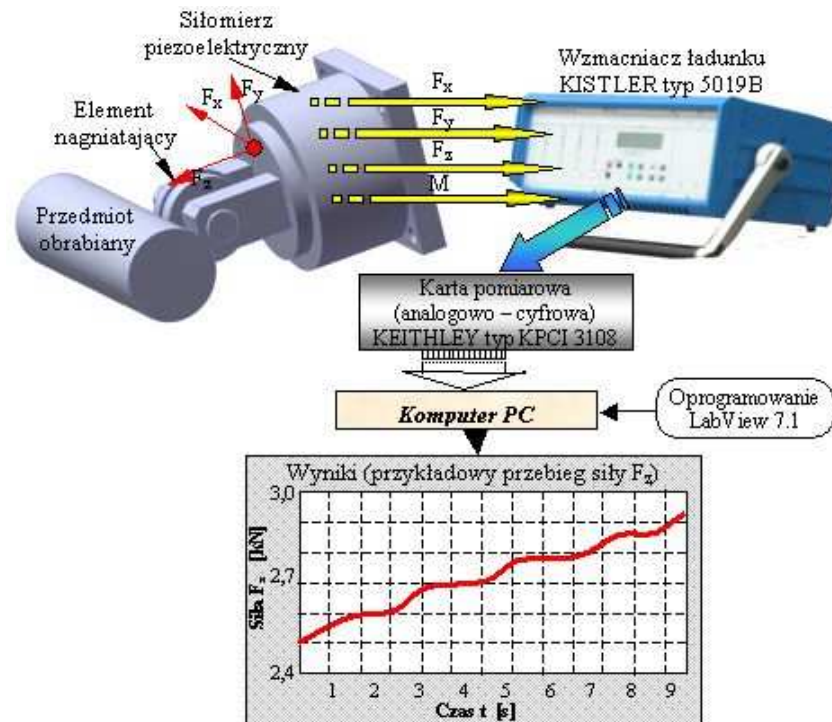
mm, wałek obrabiany wykonany ze stali C45 normalizowanej o średnicy  $d = 45$  mm. Na wałku wykonane zostały regularne nierówności o zarysie trójkątnym o kącie wierzchołkowym  $\theta = 60^\circ$ , odległości pomiędzy poszczególnymi nierównościami  $f = 1,5$  mm. Wówczas teoretyczna wysokość nierówności wynosi  $R_t = 1,3$  mm. Parametry technologiczne nagniatania wynoszą: posuw  $f_n = 1,5$  mm/obr, prędkość nagniatania  $v_n = 0,1$  m/s. Założono, że prędkość odkształceń jest bardzo mała a temperatura nagniatania równa jest temperaturze otoczenia. Wówczas naprężenia uplastyczniające opisuje następująca zależność:

$$\sigma_p = 924(0,0066 + \varepsilon_i)^{0,18}, \quad (18)$$

gdzie  $\varepsilon_i$  jest intensywnością odkształceń plastycznych.

## 5. WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA

Badania eksperymentalne procesu nagniatania toczonego z dociskiem elastycznym powierzchni chropowatej przeprowadzono na stanowisku składającym się z: tokarki konwencjonalnej TUB32, piezoelektrycznego siłomierza typu 9272 firmy Kistler, wielokanałowego wzmacniacza ładunku typu 5019B firmy Kistler, komputera PC wyposażony w kartę pomiarową oraz niezbędne oprogramowanie. Nagniatano wałki przygotowane zgodnie z opisem dla przykładu numerycznego.



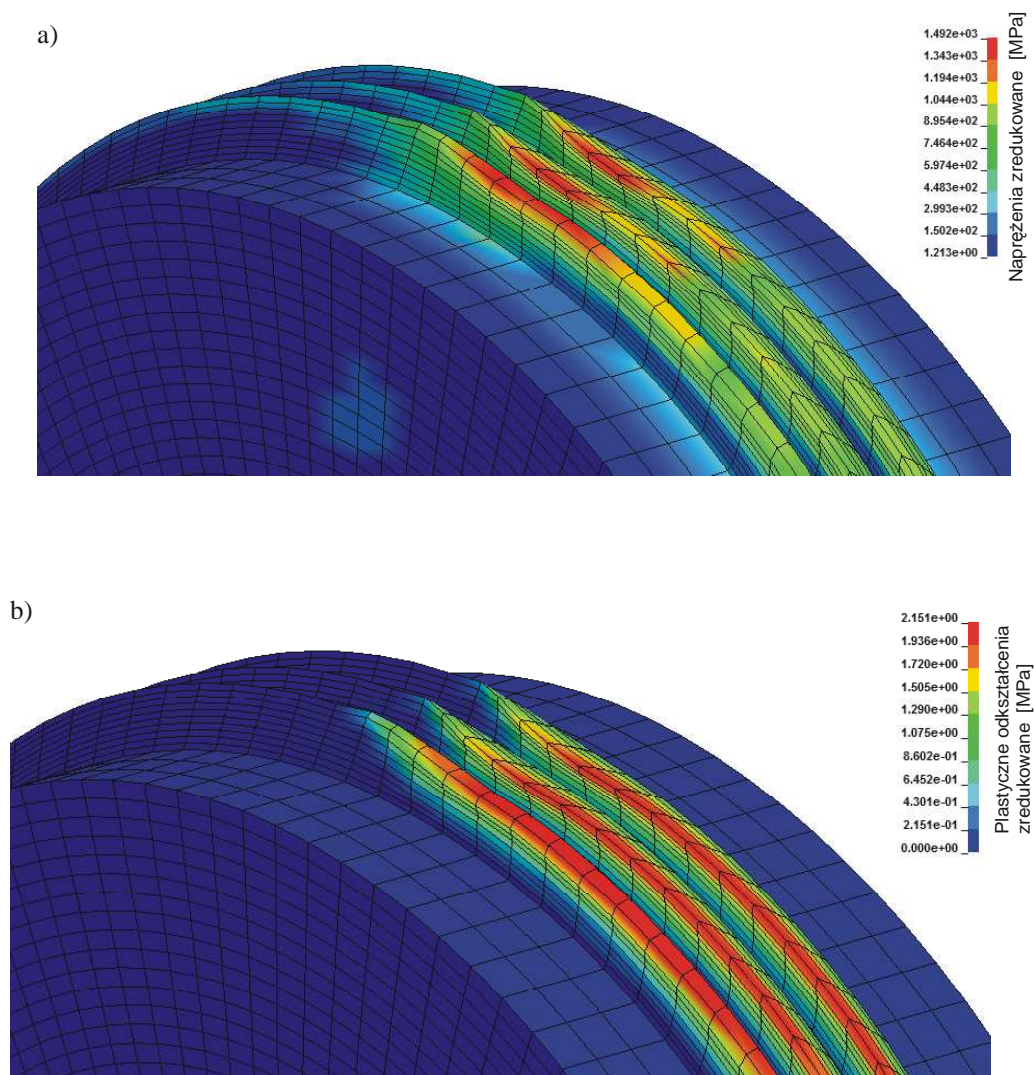
Rys. 9. Schemat blokowy stanowiska do pomiaru siły nagniatania

Akwizycji danych dokonano za pomocą karty analogowo-cyfrowej KPCI 3108 firmy Keithley oraz oprogramowania LabView wersji 7.1 firmy National Instruments. Z piezoelektrycznego czujnika siły przekazywany jest sygnał (różnica potencjałów elektrycznych) na wzmacniacz sygnału firmy Kistler, gdzie następuje jego wzmocnienie, następnie sygnał podawany jest do karty analogowo cyfrowej, gdzie następuje zamiana sygnału analogowego (napięcia) na odpowiadające sygnałowi wartości sił (sygnał cyfrowy). Schemat blokowy stanowiska do pomiaru sił nagniatania przedstawia rysunek 9.

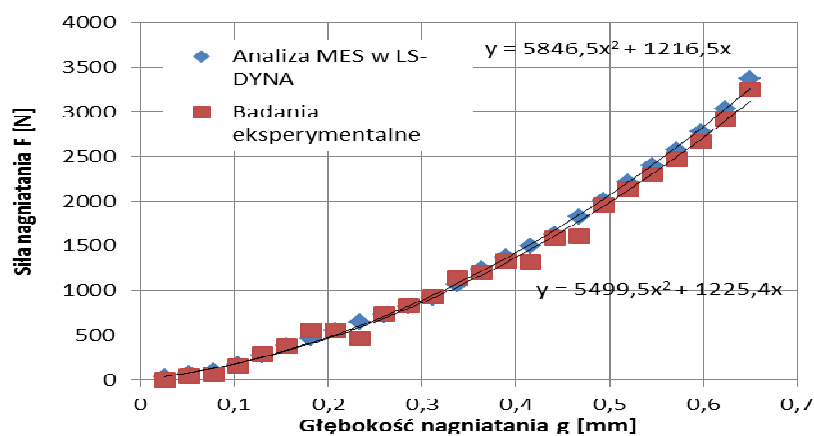
## 6. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH I POMIARÓW

Otrzymane wyniki obliczeń numerycznych w programie SYMUL-NAGN oraz w programie LS-DYNA porównano z wynikami badań eksperymentalnych i zestawiono w tabeli 1 i na rysunku 11. Analiz dokonano dla różnych zagłębień elementu nagniatającego tj.  $g = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$  oraz  $0,65$  mm tj. połowa teoretycznej wysokości nierówności. Przykładowe wyniki obliczeń numerycznych stanu naprężeń i odkształceń zredukowanych wykonanych w programie LS-DYNA przedstawiono na rysunku 10.





Rys. 10. Stan naprężeń zredukowanych (a) oraz stan plastycznych odkształceń zredukowanych (b) dla głębokości nagniatania  $g = 0,65$  mm



Rys. 11. Zmiana siły nagniatania  $F_3$  w funkcji głębokości nagniatania  $g$  dla nagniatania nierówności o parametrach: średnica wałka ze stali C45  $d = 45$  mm krążek nagniatający o średnicy  $D = 52$  mm, Na wałku wykonane zostały regularne nierówności o zarysie trójkątnym o kącie wierzchołkowym  $\theta = 60^\circ$ , odległości pomiędzy poszczególnymi nierównościami  $f = 1,5$  mm

Tab. 1. Główna siła nagniatania

Lp.	Zagłębienie narzędzia [mm]	Główna siła nagniatania $F_3$ [N]		
		Obliczona		Zmierzona
		SYMUL-NAGN	LS-DYNA	
1	0,1	201	207	212,5
2	0,2	486,5	499	512
3	0,3	974	999	1025
4	0,4	1610	1643,5	1677
5	0,5	2321,5	2369,5	2418
6	0,6	3110,5	3176	3274
7	0,65	3430	3466	3489

## 7. WNIOSKI

Jakość wyrobu nagniatanego istotnie zależy od dokładności określenia wartości parametrów technologicznych, głównie sił i/lub głębokości nagniatania. Pośrednio wpływa na nie kształt i pole obszaru styku narzędzia z przedmiotem. Podawane w literaturze wzory nie obejmują powierzchni chropowatych. Nagniatanie z siłami różnymi od wymaganej powoduje, że rzeczywista głębokość nagniatania różni się od głębokości pożądanej. W konsekwencji właściwości warstwy wierzchniej po nagniataniu istotnie różnią się od wymaganych. Może również nastąpić zniszczenie warstwy wierzchniej.

Analityczne obliczenie sił nagniatania z wymaganą dokładnością jest niemożliwe, a wykorzystanie istniejących wzorów podawanych w literaturze obarczone jest zbyt dużym błędem. Większą dokładność obliczeń uzyskuje się na drodze numerycznej. Przedstawiona w pracy metoda numerycznego obliczania głównej siły nagniatania została zaimplementowana w programie autorskim SYMUL-NAGN. Obliczone wartości sił wykazują dużą zgodność zarówno z siłami obliczonymi przy wykorzystaniu renomowanych programów MES jak i z wynikami pomiarów [8, 9], co świadczy o jej praktycznej przydatności.

Opracowane aplikacje w programie LS-DYNA pozwalają obliczyć wartości sił nagniatania dla różnych warunków ich realizacji i różnych materiałów obróbkowych. Możliwe jest również wyznaczenie sił kontaktowych, których rozkład jest silnie nieliniowy. Dokładność obliczeń siły nagniatania jest silnie zależna od przyjętego modelu materiałowego. Podstawowym problemem jest brak w literaturze danych dotyczących termodynamicznych naprężeń uplastyczniających dla różnych materiałów obróbkowych. Stąd też często zachodzi konieczność samodzielnego opracowywania takich zależności.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Przybylski W.: *Technologia obróbki nagniataniem*, Warszawa, WNT 1987.
- [2] Kukielka L.: *Theoretical and experimental foundations of surface roller burnishing with the electrocontact heating*, Book of Mechanical Engineering. Technical University of Koszalin No 47, Koszalin 1994, pp. 348.
- [3] Legutko S., Nosal S.: *Kształtowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej części maszyn*, Poznań, Ośrodek Wydawnictw Naukowych 2004.
- [4] Patyk R.: *New method of technological surface layer shaping of machine parts during duplex burnishing rolling process*. Steel Research International, Special Edition: 14<sup>th</sup> International Conference on Metal Forming, 2012, pp. 115-117.
- [5] Kulakowska A.: *Problems of surface preparation under burnishing rolling in aspect of product quality*. Steel Research International vol. 81/9, 2010, pp. 218-221.
- [6] Patyk R.: *Theoretical and experimental basis of regular asperities about triangular outline embossing technology*. Steel Research International vol. 81/9, 2010.
- [7] Patyk R., Kukielka L.: *Optimization of geometrical parameters of regular triangular asperities of surface put to smooth burnishing*. Steel Research International vol. 2, 2008, pp. 642-647.
- [8] Patyk S., Patyk R., Kukielka L.: *Analiza sił w procesie nagniatania tocznego powierzchni chropowatych*. Materiały konferencyjne TON 2008, Gdańsk-Sopot 2008.
- [9] Patyk S.: *Analiza sił nagniatania tocznego powierzchni chropowatych o trójkątnym zarysie nierówności*. Rozprawa doktorska (w przygotowaniu).
- [10] Kulakowska A.: *Experimental researches of burnishing rolling process of regular surface asperities prepared in turning process*. Steel Research International. Special Edition: 14<sup>th</sup> International Conference on Metal Forming, 2012, pp. 127-131.

- [11] Kukielka L., Kulakowska A., Patyk R.: *Numerical analysis of embossing process of regular inequalities with triangular outline on cylindrical semi product*, Journal of Systemics, Vol. 8/3, Cybernetics and Informatics 2010, pp. 36-41.
- [12] Kulakowska A., Kukielka L.: *Numerical analysis and experimental researches of burnishing rolling process with taking into account deviations in the surface asperities outline after previous treatment*. Steel Research International vol. 2, 2008.
- [13] Hill R.: *The Mathematical Theory of Plasticity*. Oxford At The Clarendon Press 1986.
- [14] Johnson K. L.: *Contact mechanics*. Cambridge University Press 1985.